

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Návrh úprav aerodynamického tunelu pro
zkoumání aerodynamických vlastností profilů listů
větrných elektráren

Modifications of the Wind Tunnel for Wind Turbines Aerodynamic
Profiles Investigation

Student:

Bodlák Martin

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Zbyszek Szeliga, Ph.D.

Ostrava 2018

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité zdroje a literaturu.

V Ostravě 21.5.2018

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 21.5.2018

.....

podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Martin Bodlák

Adresa trvalého pobytu autora práce: Josefa Fialy 10., Skrbeň, 78334

ANOTACE

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou zkoumání aerodynamických vlastností profilů listů větrných elektráren v aerodynamickém tunelu. V práci jsou uvedeny základní informace o větrných elektrárnách, stručný popis vývoje od jejich počátků až po současnost. Dále jsou v práci popsány základní aerodynamické vlastnosti listů větrných elektráren. V další kapitole jsou popsány základní typy aerodynamických tunelů, jejich rozdělení, výhody a nevýhody a jejich použití. Ve výpočetní části je proveden základní výpočet silových účinků na konkrétní aerodynamický profil. A v poslední části práce je vlastní návrh úprav v aerodynamickém tunelu umístěném v laboratoři VŠB-TUO, tj. uchycení aerodynamického profilu, listu v aerodynamickém tunelu umožňující měření a vyznačení poláry měřeného profilu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Aerodynamický tunel; aerodynamika; větrná elektrárna; vztlaková síla; odporová síla

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the problems of aerodynamic properties of profiles of wind power plants in wind tunnel. This thesis given basic information about wind power plants, a brief description of the developments from their beginnings to the present. The basic aerodynamic properties of the leaves of wind turbines are described below. The other chapters are described the basic types of wind tunnels, their distribution, advantages and disadvantages and their use. In the calculation part is a basic calculation of the force effects on a particular aerodynamic profile. And in the last part of this thesis there is a proposal for modification in the wind tunnel that is in the VŠB-TUO laboratory, ie. the fitting of the aerodynamic profile, a leaf in the wind tunnel enabling measurement and marking the polarity of the measured profile.

KEYWORDS

Wind tunnel; aerodynamic; wind power plant; buoyancy force; resistance force

Obsah

Úvod.....	8
1 Vývoj větrné elektrárny	9
1.1 První větrná elektrárna	9
1.2 Vývoj instalací větrných elektráren v ČR i ve světě	10
1.3 Vývoj technologie větrné elektrárny	10
1.3.1 Princip činnosti	11
1.3.2 Druhy větrných turbín.....	11
1.3.3 Regulace.....	12
1.3.4 Účinnost větrné elektrárny	13
1.3.5 Pohony generátoru	14
1.4 Budoucí vývoj rotorových listů větrné elektrárny	14
2 Aerodynamika profilu listu větrné elektrárny	16
2.1 Vztlakové turbíny	16
2.1.1 Vztlakové turbíny s vodorovnou osou rotace	17
2.1.2 Vztlakové turbíny se svislou osou rotace typu Darrieus.....	17
3 Aerodynamické tunely	19
3.1 Rozdělení aerodynamických tunelů	19
3.1.1 Aerodynamické tunely s otevřeným okruhem	19
3.1.2 Aerodynamické tunely s uzavřeným okruhem	20
3.1.3 Aerodynamické tunely podle rychlosti proudění vzdušiny	21
3.2 Hlavní části aerodynamického tunelu	21
3.3 Využití aerodynamických tunelů	22
4 Stanovení základních silových účinků na aerodynamický profil	23
4.1 Charakteristika aerodynamického tunelu, určení rychlosti obtékání profilu	23
4.2 Základní veličiny profilu křídla	25
4.3 Určení součinitele vztlaku a odporu.....	26
4.4 Určení rychlosti větru.....	26

4.5	Určení rozměrů profilu.....	27
4.6	Určení hustoty vzduchu.....	27
4.7	Výpočet vztlaku a odporu pro rychlost 40 m/s	27
4.8	Výpočet vztlaku a odporu pro rychlost 20 m/s	28
4.9	Volba vhodného vážního čidla pro snímání odporové síly	28
4.10	Volba vhodného vážního čidla pro snímání vztlakové síly.....	29
5	Návrh uchycení profilu listu v aerodynamickém tunelu.....	30
5.1	Základní části navrhovaného uchycení	30
5.1.1	Měření v ose x.....	31
5.1.2	Měření v ose y.....	32
5.1.3	Natáčení profilu	32
5.1.4	Rámeček.....	33
5.1.5	Úprava aerodynamického tunelu	34
	Závěr	35
	Použité zdroje a literatura	36
	Přílohy.....	38

Seznam použitých zkratk a symbolů

F_x	odporová síla	[N]
F_y	vztlaková síla	[N]
S	plocha	[m ²]
b	délka tětiny profilu, hloubka profilu	[m]
c_x	součinitel odporu	[-]
c_y	součinitel vztlaku	[-]
v	rychlost obtékání rofilu	[m/s]
α	úhel náběhu	[°]
α_0	úhel nulového náběhu	[°]
β	úhel relativní rychlosti	[°]
ρ	hustota vzduchu	[kg/m ³]
φ	úhel odklonění profilu	[°]
$\Delta V_1, \Delta V_2$	složky proudu vzduchu	[-]

Úvod

V rešeršní části se budu zabývat vývojem technologie větrných elektráren od jejího vzniku až do současnosti, popíši základní aerodynamiku profilu listu větrné elektrárny a dále se zaměřím na aerodynamické tunely, jejich rozdělení, hlavní části tunelů a jejich využití v technické praxi.

Ve výpočtové části se budu zabývat výpočtem vztlakové a odporové síly působící na profil listu, charakteristikou ventilátoru v aerodynamickém tunelu a následně návrhem systému uchycení listu, aerodynamického profilu v průtočném profilu aerodynamickém tunelu s ohledem na stanovení parametrů vztlaku a odporu profilu, zvolení vhodného čidla pro měření zatížení profilu listu při působení aerodynamické síly.

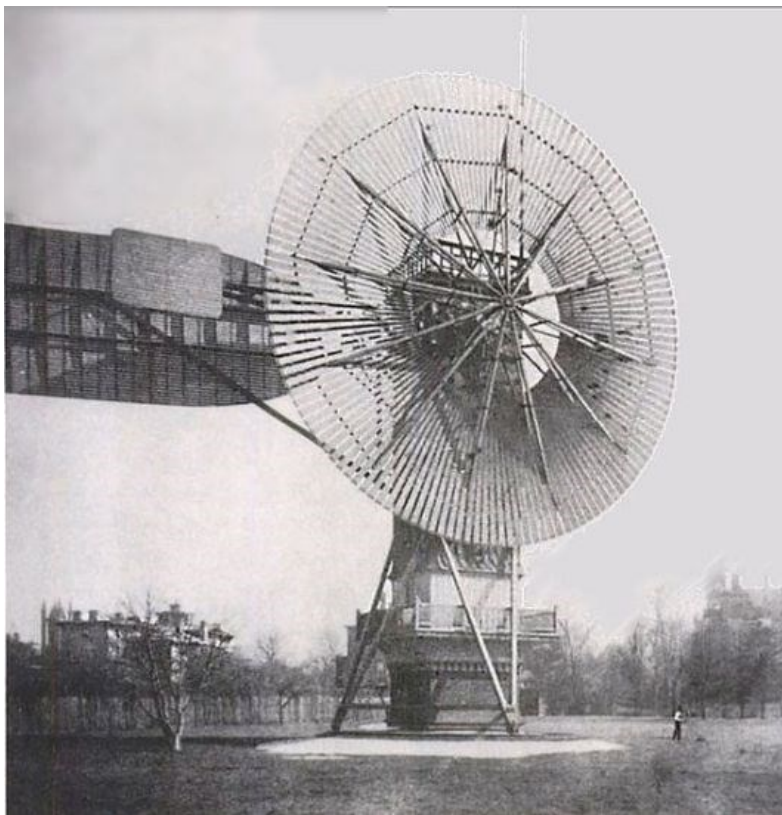
V praktické části navrhnu vhodné uchycení profilu listu v aerodynamickém tunelu s ohledem na možnost jeho natáčení a měření působících sil na profil listu.

1 Vývoj větrné elektrárny

1.1 První větrná elektrárna

Předkem větrných elektráren byly větrné mlýny a větrná čerpadla. První větrnou elektrárnu na světě postavil Američan Charles F. Brush, který roku 1888 sestrojil první automatickou větrnou turbínu, která byla napojena na generátor elektrického proudu. Rotor elektrárny měl průměr 17 m. Výkon generátoru byl 12 Kw.

Elektrárna byla technologicky i výkonem dokonalejší, než první evropská větrná elektrárna postavena v dánském Askově o tři roky později. [1]



Obrázek 1: První větrná elektrárna na světě [1]

1.2 Vývoj instalací větrných elektráren v ČR i ve světě

Větrná energie se na počátku 21. století stala nejrychleji se vyvíjejícím oborem energetiky v Evropě. V období 2000–2015 vykázala nejvyšší nárůst instalovaného výkonu mezi všemi dalšími zdroji.

Přibylo 138 tis. MW instalovaného výkonu, zatímco u zdrojů na zemní plyn 120 tis. MW a fotovoltaiky 95 tis. MW. Již koncem 90. let dosáhlo nejvyššího instalovaného výkonu Německo (25 % celosvětového instalovaného výkonu). Bohužel v Česku se využití větrné energetiky roku 1996 pozastavilo a na dalších 6 let ustrnula na instalovaném výkonu, dokonce došlo k poklesu o 1875 kW demontáží sedmi větrných elektráren. [2]

Tabulka 1: Vývoj instalací větrných elektráren v ČR v letech 1991–2008 [2]

Rok	Počet větrných elektráren			Instalovaný výkon [kW]		
	Nové	Odstraněné	Celkem	Nový	Odstraněný	Celkem
1991	1		1	150		150
1992	3		4	465		615
1993	4		8	910		1 525
1994	10		18	4170		5 695
1995	6	1	23	2545	75	8 165
1996	0	2	21	240	375	8 030
1997	0	2	19	0	715	7 315
1998	0	2	17	0	635	6 680
1999	0	1	16	0	150	6 530
2000	0		16	0		6 530
2001	0		16	0		6 530
2002	1		17	100		6 630
2003	3		20	2 700		9 330
2004	13	1	32	7 180	315	16 195
2005	15		47	12 750		28 945
2006	20		67	24 660		53 605
2007	33	5	95	63 200	1 915	114 890
2008	19	3	111	31 600	1 165	145 325

1.3 Vývoj technologie větrné elektrárny

V dnešní době jsou nejčastěji stavěny větrné elektrárny s výkonem nad 3 MW, špičkové dosahují výkonů až 7,5 MW a na zkušebních lokalitách nové typy necelých 8 MW.

Koncem 20. století se výroba koncentruje do větších firem, zlepšuje se finanční zázemí a tím i financování vývoje. Dostavují se nová řešení, nové materiály i nové řídicí systémy provozu větrných elektráren. Lídrem v tomto oboru je Dánsko spolu s Německem. [2]

1.3.1 Princip činnosti

Větrná turbína transformuje kinetickou energii proudícího vzduchu na rotační mechanickou energii. Ta je v generátoru převedena na energii elektrickou. Listy rotoru mají speciálně tvarovaný profil a pracují na principu buď vztlakové, nebo odporové síly. [3]

1.3.2 Druhy větrných turbín

Odporové turbíny (drag turbine)

Z historického hlediska jsou starší. Principem jsou jednodušší, ale dosahují menší účinnosti než turbíny vztlakové. Z tohoto důvodu se v dnešní době málo používají. Využívají principu rozdílu sil působících na lopatky, v důsledku jejich různého odporu vůči proudícímu vzduchu. Toho docilují dvěma způsoby:

- Různým tvarem lopatek

Lopatka má různý aerodynamický odpor v závislosti na směru proudícího větru. Příkladem jsou lopatky miskovitého tvaru.

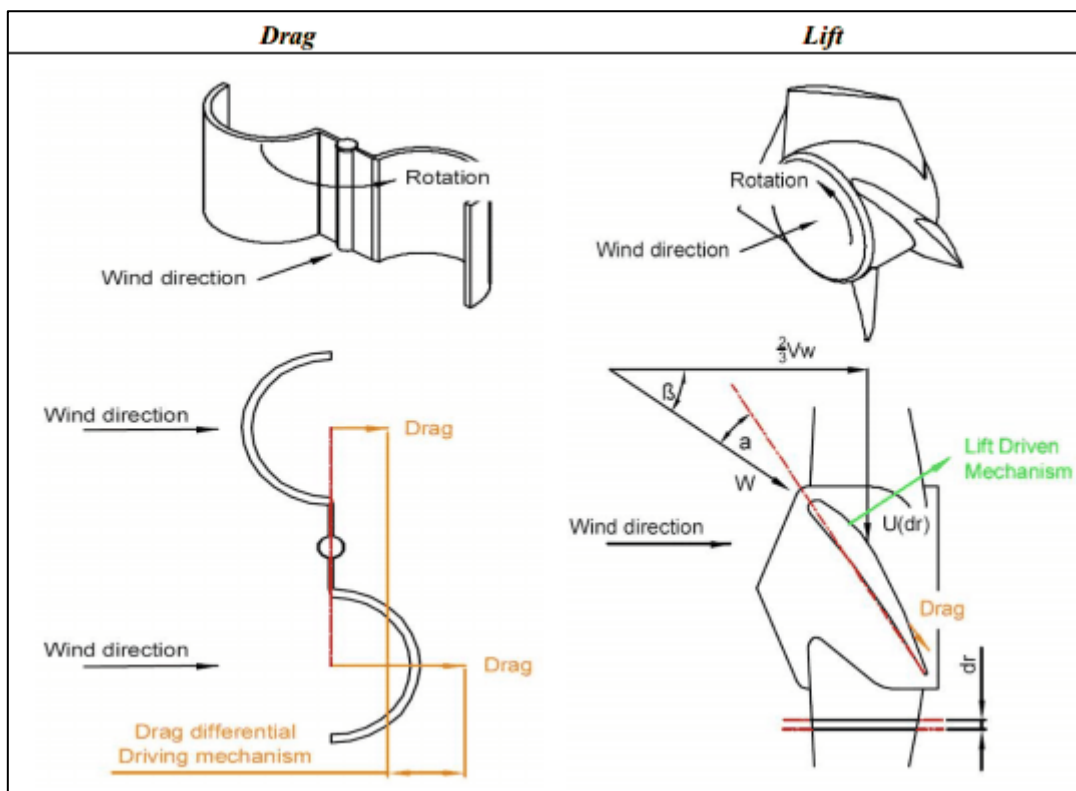
- Natočením lopatek

Lopatky jsou natáčeny v závislosti na pozici rotoru a směru působícího větru.

Tento typ řešení je komplikovanější, ale dosahuje vyšší účinnosti.

Vztlakové turbíny (lift turbine)

V dnešní době je to nejpoužívanější typ. Využívají síly vznikající na rotorovém listu při obtékání vzduchem, tzv. aerodynamické vztlakové síly. Tento druh síly vzniká díky tvarovanému profilu lopatek, podobně jako na křídlech letadla. Na list rotoru působí dvě síly– vztlaková (lift force), která je příčinou rotačního pohybu turbíny (vrtule) a síla odporová (drag force), která působí proti směru pohybu a je v tomto případě nežádoucí.



Obrázek 2: Odporová (drag) a vztlačková (lift) turbína [3]

Podle osy otáčení rotoru se turbíny dále dělí na horizontální (anglicky označované jako HAWT – horizontal axis wind turbine) a vertikální (VAWT – vertical axis wind turbine).

Horizontální turbíny

Musí směřovat proti směru větru, proto se u menších elektráren využívá směrové lopatky a u větších většinou větrného senzoru a servo motoru. Tyto turbíny jsou v dnešní době nejvyužívanější hlavně z důvodu jejich vyšší účinnosti (okolo 48 %) oproti vertikálním turbínám.

Vertikální turbíny

Není nutné měnit jejich směr, což je výhodou v oblastech, kde se směr větru velmi často mění. Další výhodou je možnost umístění generátoru a převodového ustrojí na zemském povrchu, což značně zjednodušuje údržbu. Nezabírají tolik prostoru jako horizontální turbíny a jsou méně hlučné. Jejich nevýhoda je vyšší cena než u turbín horizontálních a nižší účinnost (okolo 38 %). [3]

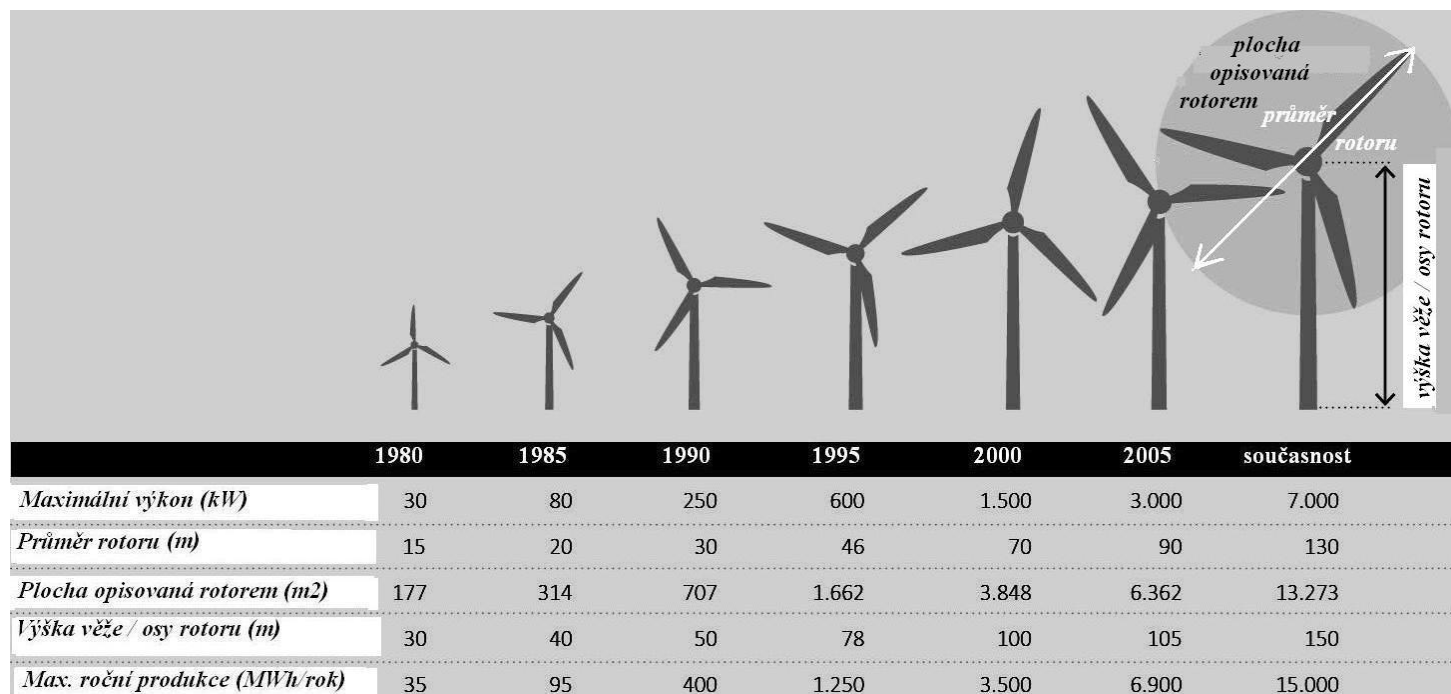
1.3.3 Regulace

Všechny v současnosti vyráběné velké větrné elektrárny s vodorovnou osou rotace jsou vybaveny tzv. „pitch“ regulací, která umožňuje změnou úhlu náběhu kontinuální nastavování listů podle větrných poměrů a nastavených parametrů provozu daného typu

elektrárny. Starším typem regulace je regulace typu „stall“, kdy jednotlivé listy mají zakomponován mechanický systém, který při překročení bezpečných otáček rotoru změní např. klapkami, nebo natočením konců listů aerodynamické poměry a rotaci zpomalí, až zastaví. [2]

1.3.4 Účinnost větrné elektrárny

V turbíně se kinetická energie větru mění na energii otáčivého pohybu. V praxi není možné, aby veškerá energie větru byla využita. Množství vzduchu, které dosedne na lopatky větrné turbíny, je musí následně opustit. Bentzovo pravidlo udává maximální využití energie větru ve větrné turbíně, které dosahuje 59 % veškeré kinetické energie proudícího vzduchu skrz turbínu. Je nutné přičíst ztráty třením a odporem listů rotoru, převodové ztráty a ztráty v generátoru a měniči. Účinnost současných větrných elektráren s třílístým rotorem může dosáhnout 75-80 % Bentzova limitu při jmenovitých otáčkách. Ale teoreticky jsou účinnější rotory se dvěma, nebo i jedním listem rotoru, jejichž provozní nevýhodou je nepravidelné zatížení tlakem větru v okamžiku, kdy je jeden list v dolní poloze, kde je proud vzduchu ovlivněn zastíněním nebo turbulencemi kolem tubusu (věže) elektrárny. Třílístý rotor má z tohoto pohledu nejvyváženější chod. [2,3]



Obrázek 3: Růst rozměrů a výkonů větrných elektráren [2]

1.3.5 Pohony generátoru

Generátor může být poháněn jedním ze dvou systémů. První se systémem „direct drive“, kde chybí převodovka, druhý s klasickým generátorem a převodovkou. Tyto dvě koncepce využívají elektrárny Enercon, ty využívají systém „direct drive“ a elektrárny Vestas se systémem převodovka před generátorem.

Elektrárny Enercon jsou typické gondolami vejčitého tvaru, v nichž je v místě největšího průměru uložen prstencový mnohapólový generátor. [2]



Obrázek 4: Větrná elektrárna Enercon E-112 [2]

1.4 *Budoucí vývoj rotorových listů větrné elektrárny*

Vyrábějí se stále výkonnější stroje. Před 20 lety se instalovaly větrné elektrárny s výkonem 250kW, před deseti lety se výkony pohybovali řádově v MW a je jenom otázkou času kdy výkon překročí 10 MW.

Větrná elektrárna o výkonu 7MW má rotor o průměru 130 m. Délka listu se tedy pohybuje na hranici 65 m. Doprava takto dlouhého rotorového listu je velmi náročná. Z důvodu náročné přepravy takto veliké větrné elektrárny je omezeno území, kde může být umístěna. Firma Enercon našla řešení v podobě děleného rotorového listu a poprvé jej použila u své větrné elektrárny Enercon E -126. Prototyp byl postaven v roce 2007.



Obrázek 5: Dělený rotorový list větrné elektrárny Enercon E-126 [4]

List je dělen zhruba v polovině, což je cca 30 m. S touto délkou je transport bezproblémový a dá se přirovnat ke kategorii 2MW elektrárny. Tímto se také velmi zvětšuje rozsah oblastí, kam se s takto velkou větrnou elektrárnou lze dostat.

Konstrukce listu je poloskořepinová (technologie, která se běžně užívá na křídlech dopravních letounů), tzn. že na podélné nosníky se připevní plechová žebra, která mají požadovaný tvar listu. Celek se pak pokryje plechem, který tvoří potah. Koncová polovina listu je laminátové konstrukce. Obě poloviny jsou k sobě sešroubovány. Tento spoj tvoří 20 ks šroubů o velikosti M52. Kořenová část je pak na konci notně zpevněna, aby mohla přenést síly, které jsou do ní vnášeny přes kotevní šrouby. U prvních instalací této 6MW elektrárny se doba kompletní montáže jednoho listu pohybovala přibližně okolo 1,5 dne. [4]

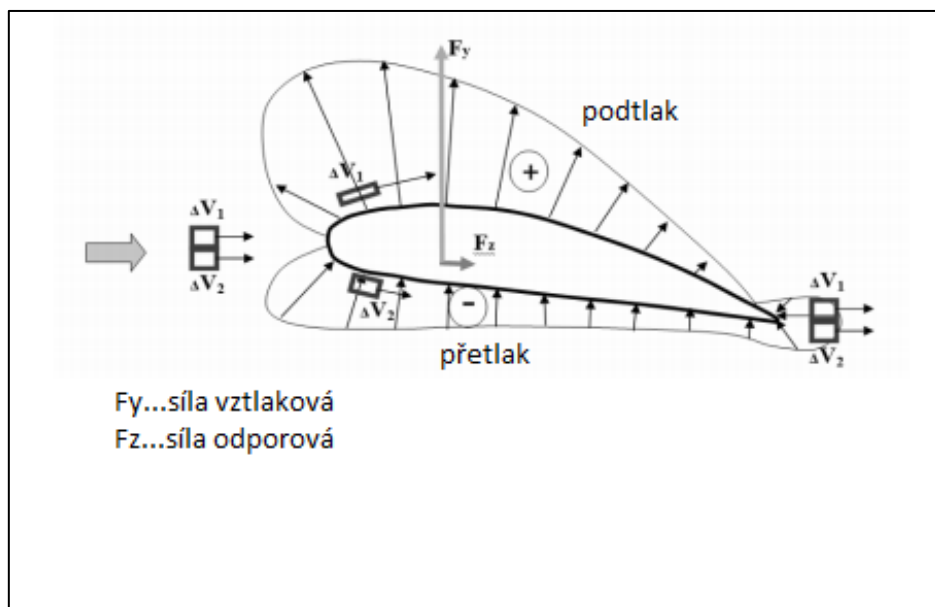


Obrázek 6: Kořenová polovina listu (čelo, kterým se přišroubovává na rotorovou hlavu) [4]

2 Aerodynamika profilu listu větrné elektrárny

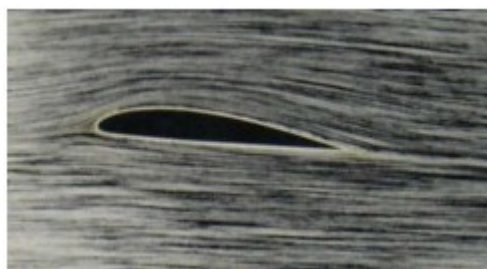
2.1 Vztlakové turbíny

Můžou být konstruovány jak s vodorovnou osou rotace, tak i se svislou osou rotace. Větrné motory pracující na vztlakovém principu pracují na základě aerodynamického principu s aerodynamickým profilem. [5]



Obrázek 7: Obtékání aerodynamického profilu - tlaková pole [5]

Jednotlivé složky proudu vzduchu ΔV_1 a ΔV_2 jsou na náběžné hraně profilu rozděleny. ΔV_1 proudí po horní rovině a ΔV_2 po spodní rovině profilu. Dráhy, po kterých tyto dvě složky větru proudí nejsou stejné, a proto musí existovat rozdíl v rychlostech těchto dvou složek. Nad horní plochou se zhušťují proudnice a narůstá rychlost proudění, na spodní straně profilu rychlost proudění klesá. V souladu s Bernoulliho rovnicí, která při malých rychlostech proudění může být použita i pro proudění vzduchu, dochází v místech s větší rychlostí k poklesu statického tlaku, naopak v místech, kde dochází k poklesu rychlosti, statický tlak stoupá. [5]



Aerodynamická síla vyvolaná podtlakem bývá dvojnásobná oproti síle od přetlaku.

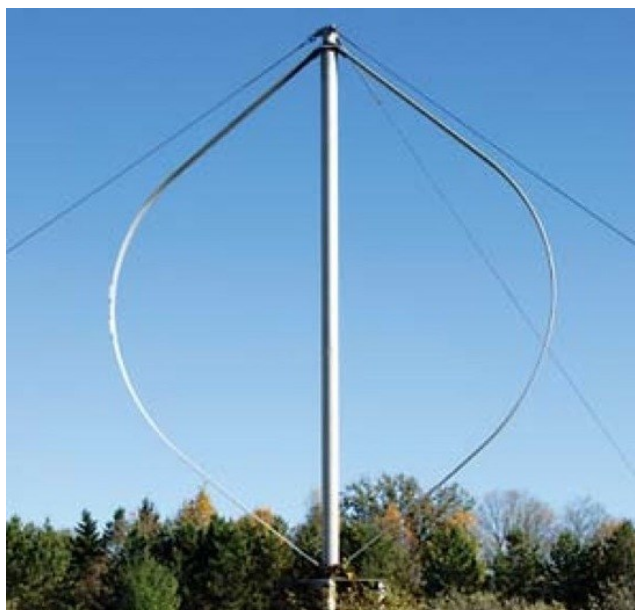
2.1.1 Vztlkové turbíny s vodorovnou osou rotace

Jsou to rychloběžné větrné turbíny. V současnosti se staví výhradně v třílistém provedení. U větších výkonů dosahuje účinnost i přes 40 %. Vrtulové listy mají kvalitní aerodynamický profil, který se mění po celé délce listu. [5]



Obrázek 9: Třílistá větrná elektrárna s vodorovnou osou rotace [6]

2.1.2 Vztlkové turbíny se svislou osou rotace typu Darrieus



Obrázek 10: Větrná elektrárna typu Darrieus [5]

Rotor je složen ze dvou, případně tří listů, které jsou tvořeny stejným aerodynamickým profilem po celé délce a mají určitý poloměr zakřivení. Listy jsou uchyceny na koncích, v horním a dolním bodě stožáru. Stožár je ukotven lany. V dolní části stožáru je generátor. Rotací listů větrné elektrárny v proudu vzduchu je vyvozován silový účinek. Silový účinek na list v jednotlivých bodech po obvodu roztečné kružnice je proměnlivý, kotevní lana tudíž slouží pro stabilizaci celé konstrukce, proto konstrukce zaujímá relativně velkou plochu.

Tyto stroje nejsou závislé na směru větru, což je jejich velkou výhodou. Další výhodou je jednodušší konstrukce listu a dále pak méně náročná výstavba. Nevýhodou těchto strojů je nemožnost samospouštění. V porovnání s rotory s vodorovnou osou rotace mají nižší účinnosti a vyšší hmotnosti, značné nerovnoměrnosti během jedné otáčky a obtížně se regulují. Rozdělení rychlosti větru po výšce rotoru je taky z důvodu drsnosti povrchu terénu nerovnoměrné.

Využívají se hlavně v Kanadě. [5]

3 Aerodynamické tunely

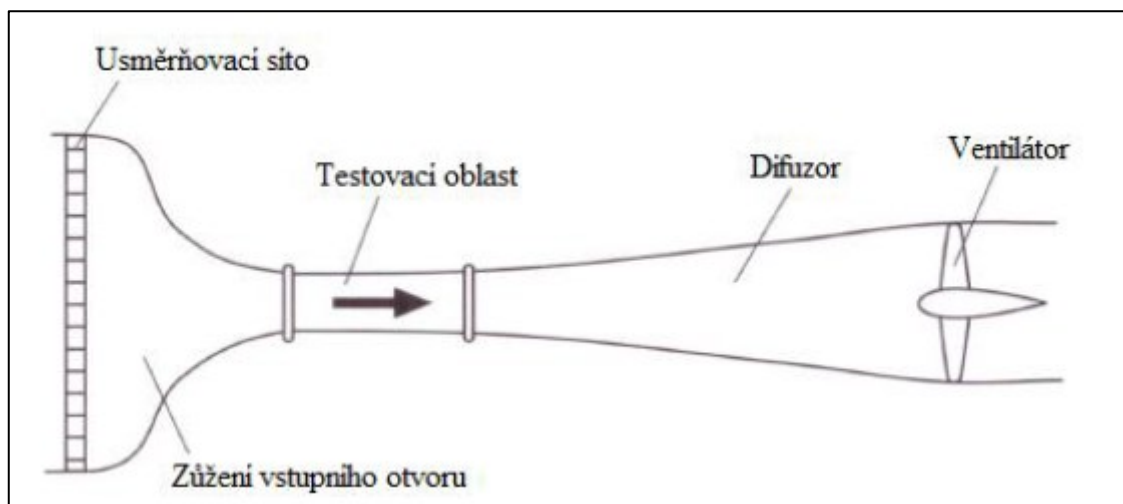
Aerodynamický tunel je technické zařízení, které se používá ke zkoumání aerodynamických vlastností těles při jejich obtékání plynem. Konstruuje se buď s otevřeným okruhem (proudící plyn se nevrací zpět), nebo s uzavřeným okruhem (plyn, resp. vzduch cirkuluje v uzavřeném okruhu bez výrazných ztrát kinetické energie a tlaku). [7]

3.1 Rozdělení aerodynamických tunelů

Základem aerodynamického tunelu je proud vzduchu, který je vytvářen pomocí ventilátoru (v některých tunelech jsou používány vysokotlaké nádoby). Nejvyšší rychlost vzduchu je dosažena v nejmenším průřezu díky téměř konstantní hustotě vzduchu. Místo nejmenšího průřezu je používán jako zkušební úsek pro umístění zkušebních těles. [8]

3.1.1 Aerodynamické tunely s otevřeným okruhem

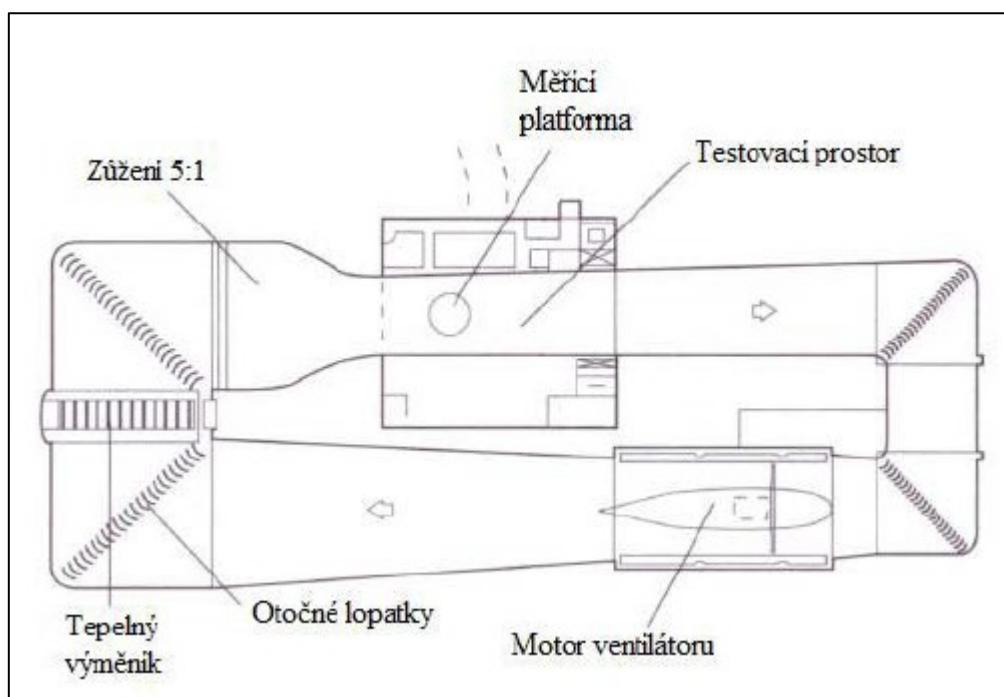
Nejjednodušší tunel s otevřeným okruhem je Eiffelův typ. Tunel s otevřeným okruhem má nižší náklady na výstavbu. Jestliže jsou stálé okolní podmínky, pak se teplota zkušebního úseku během testování nemění. Tento typ tunelu má dvě podstatné nevýhody. První z nich je vliv okolních podmínek na proudění. Pokud je tunel umístěn venku, pak vítr může mít velký vliv na kvalitu a rychlost průtoku vzduchu ve zkušební části. Navíc hluk ventilátoru proniká přímo ven a v případě většího aerodynamického tunelu to může znamenat porušení hlukových limitů. Kvůli odebrání vzduchu z okolního prostředí není vhodné umístění tunelu v chladných klimatických podmínkách. Druhá nevýhoda je větší energetická náročnost než u velikostně stejného tunelu uzavřeného typu. Proto je tento typ hodně používán zejména na univerzitách a jiných vzdělávacích zařízeních, kde tím, že se tunel umístí ve vnitřních prostorech, nevýhody obvykle vymizí. [8]



Obrázek 11: Eiffelův typ aerodynamického tunelu [8]

3.1.2 Aerodynamické tunely s uzavřeným okruhem

Jsou méně energeticky náročné a nezávislé na okolních podmínkách (vítr). Mohou mít horizontální nebo vertikální konstrukci (vertikální konstrukce zabírá méně místa). Výhodou je menší hlučnost a jednoduché ovládání podmínek proudění vzduchu. Mezi nevýhody patří relativně vyšší náklady na výstavbu. Další nevýhodou je hromadění kouře (pokud vzniká při testování) nebo hromadění teploty (v důsledku tření vzduchu o stěny tunelu) během dlouhého testování. Z toho důvodu je mnoho tunelů vybaveno vzduchovými výměníky. Tyto vzduchové výměníky jsou trvale otevřené, a tak probíhá neustálá výměna vnitřního vzduchu s okolním vzduchem. [8]



Obrázek 12: Aerodynamický tunel s uzavřeným okruhem [8]

3.1.3 Aerodynamické tunely podle rychlosti proudění vzdušiny

- a) Nízkorychlostní aerodynamický tunel-rychlost proudu vzdušiny v měřicím prostoru aerodynamického tunelu je tak nízká, že se ještě neprojevují význačnější vlivy stlačitelnosti.
- b) Vysokorychlostní aerodynamický tunel-rychlost proudu vzdušiny v měřicím prostoru je dostatečně vysoká, aby bylo možno pozorovat vlivy stlačitelnosti.
- c) Podzvukový (subsonický) aerodynamický tunel-rychlost nerušeného proudu vzdušiny v měřicím prostoru je dostatečně vysoká, aby se mohl projevit vliv stlačitelnosti, ale je vždy nižší než rychlost zvuku.
- d) Nadzvukový (supersonický) aerodynamický tunel-rychlost nerušeného proudu vzdušiny v měřicím prostoru přesahuje rychlost zvuku. [9]

3.2 Hlavní části aerodynamického tunelu

Aerodynamický tunel se skládá z několika hlavních částí.

První část je generátor proudu vzduchu. Jako generátor se používá například ventilátor nebo kompresor. Vzduch je vháněn do části, kde je umístěn měřený model. Je výhodnější použít více ventilátorů pro zajištění lepšího proudění vzduchu.

Ventilátory mohou mít průměr i několik metrů, pokud jde o velké aerodynamické tunely, ve kterých se měří třeba automobily nebo lodě. Po průchodu vzduchu ventilátory vznikají od lopatek ventilátorů turbulence vzduchu. Proto musí být tento vzduch usměrněn na laminární proudění, protože by velmi ovlivňoval měření, které by bylo nepřesné. Problém odstraníme vložením vertikální a horizontální lopatky do prostoru mezi ventilátorem a měřicím modelem. Tyto lopatky jsou vyladěné tak, aby se narušilo turbulentní proudění a zajistilo se co největší laminární proudění vzduchu.

Další způsob pro eliminaci turbulentního chování vzduchu je použití aerodynamických tunelů, které mají kruhový průřez. Při použití aerodynamického tunelu s čtvercovým průřezem by mohly vzniknout nežádoucí turbulence v rozích tunelu. To u použití kruhového průřezu odpadá. Důležitý faktor, je vnitřní obložení stěn tunelu. Povrch by měl mít co nejmenší vliv na procházející vzduch. Tento problém se eliminuje polohou měřeného modelu. Model se umísťuje do centrální části tunelu. [7,10]

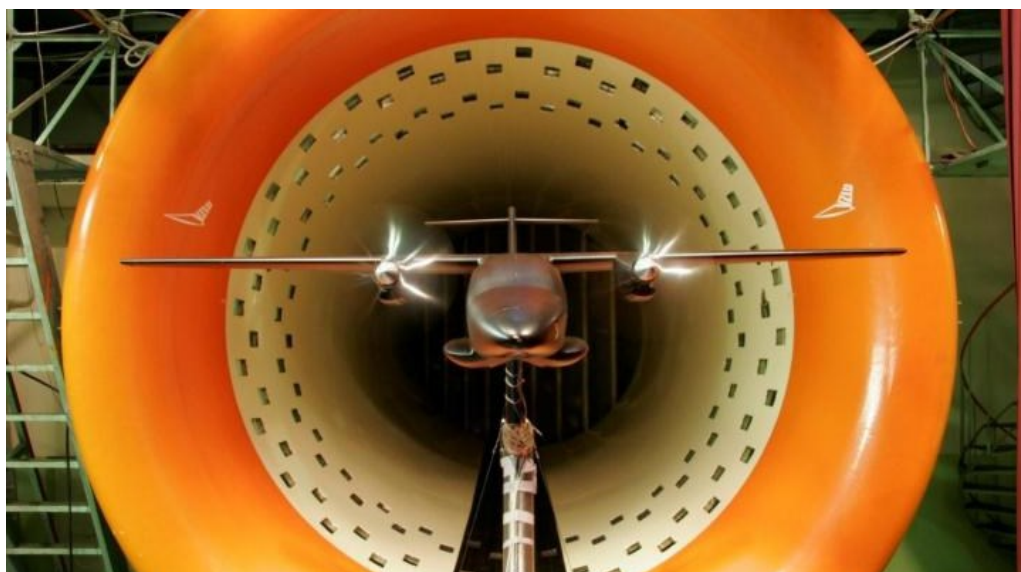


Obrázek 13: Aerodynamický tunel NASA [10]

3.3 Využití aerodynamických tunelů

Aerodynamické tunely nízkých rychlostí se používají převážně pro měření modelů dopravních prostředků jako například modely aut, vlaků a letadel. Můžeme zde měřit i antény či radary a zkoumat tak jejich aerodynamické vlastnosti. Dalším měřeným prvkem jsou větrné elektrárny. Zjišťuje se i efektivnost pro danou lokalitu, kde mají být větrné elektrárny instalovány.

Aerodynamické tunely vysokých rychlostí se využijí pro měření raket, profilů křídel či modelů letadel. [11,12]



Obrázek 14: Nízkorychlostní tunel [11]

4 Stanovení základních silových účinků na aerodynamický profil

Pro navržení uchycení profilu listu a zařízení, kterým se budou získávat data z měření, potřebuji vypočítat předběžné hodnoty aerodynamických sil. Pro předběžný výpočet aerodynamických sil jsem si zvolil aerodynamický profil NACA 4412.

4.1 Charakteristika aerodynamického tunelu, určení rychlosti obtékání profilu

Zjištění charakteristiky ventilátoru, tunelu v stávajícím provedení je důležité pro stanovení dosahovaných rychlostí průtoku vzduchu při vlastním měření. Bylo provedené měření charakteristiky ventilátoru viz Lit (13), na které v této práci navážu. Dále bylo stanoveno chování listu vloženého v proud vzdušiny. Důležitá je pak maximální dosažitelná rychlost obtékání profilu v měřicím úseku aerodynamického tunelu.

Pro stanovení jednotlivých bodů charakteristiky ventilátoru je nutné měnit průtok vzdušiny, tlakovou ztrátu tunelu. Změna průtoku byla prováděna seškrcením v sacím otvoru aerodynamického tunelu.

Jednotlivé průtoky se určí z výpočtu rychlosti protékající vzdušiny a z plochy průřezu tunelu:

$$\dot{V} = \sqrt{\frac{2 \cdot p_d}{\rho_{vzd}} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4)$$

V- průtok v měřicí části tunelu

p_d - dynamický tlak

ρ_{vzd} - hustota vzduchu

d- průměr měřicí části

Celkový tlak ventilátoru Δp_{cv} je určen rozdílem celkových středních tlaků na výtlaku a sání ventilátoru podle rovnice:

$$\Delta p_{c,v} = p_{c1} - p_{c2} \quad [\text{Pa}] \quad (5)$$

p_{c1} - celkový tlak na výtlaku

p_{c2} - celkový tlak na sání

$$p_{c1} = p_{d1} - p_{st1} \quad [\text{Pa}] \quad (6)$$

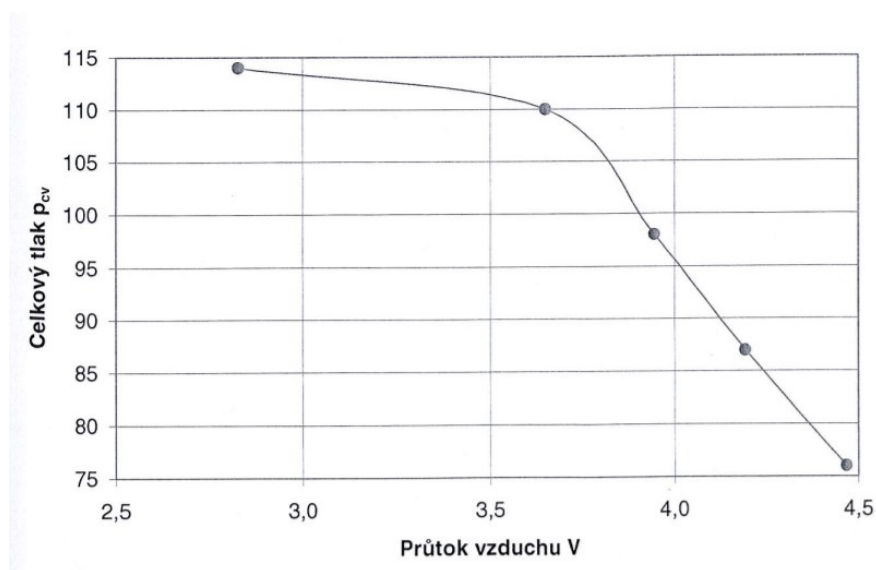
$$p_{c2} = p_{d2} - p_{st2} \quad [\text{Pa}] \quad (7)$$

p_{d1}, p_{d2} – dynamické tlaky sání a výtlaku. Tyto tlaky jsou stejně velké a v rovnici (5) se vyruší. Statický tlak $p_{st1}=0$, protože vypouštěná vzdušina má stejný tlak jako vzduch v okolí. [13]

Tabulka 2: Celkový tlak a průtok vzduchu dle měření viz. Literatura [13]

Průměr		$d = 0,5$		[m]
Otáčky		$n = 770$		[ot.min ⁻¹]
Počet měření	p_d	p_{st2}	V	p_{cv}
	[Pa]	[Pa]	[m ³ .s ⁻¹]	[Pa]
1	300	-76	4,47	76
2	264	-87	4,19	87
3	234	-98	3,95	98
4	200	-110	3,65	110
5	120	-114	2,83	114

Z výsledných hodnot je sestrojen graf tlakové charakteristiky ventilátoru.



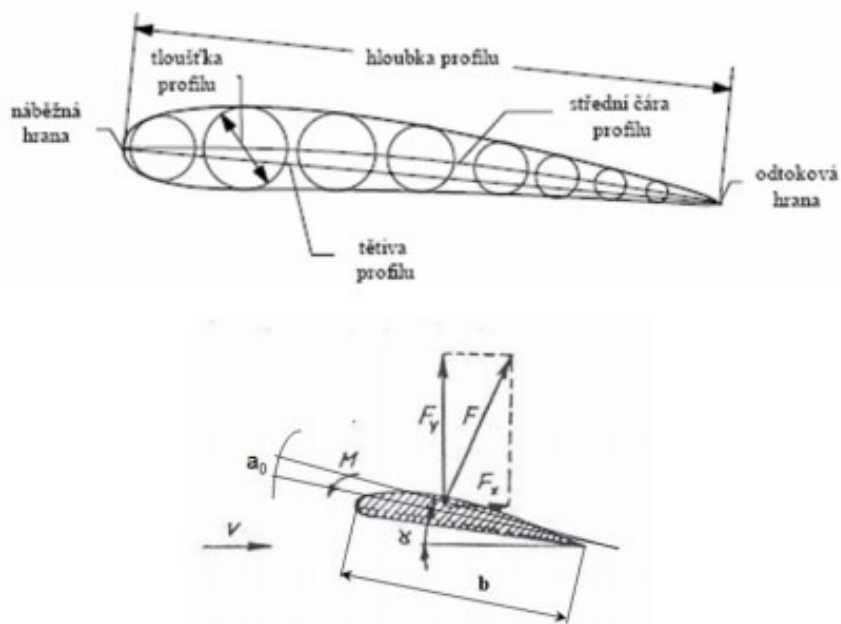
Obrázek 15: Graf tlakové charakteristiky ventilátoru [13]

Na základě znalosti tlakové ztráty daného aerodynamického profilu jsem díky znalosti charakteristiky ventilátoru a tlakové ztráty systému určil rychlost obtékání profilu v místě měření.

Byl stanoven provozní bod, kde danému průtoku odpovídá rychlost obtékání v místě měření aerodynamického profilu cca 40 m/s.

Díky určení maximální rychlosti průtoku vzduchu v aerodynamickém tunelu při měření mohou zvolit na základě výpočtu aerodynamických sil vhodná čidla pro snímání velikosti sil působících na profil listu.

4.2 Základní veličiny profilu křídla



Obrázek 16: Základní veličiny profilu [5]

α ...úhel náběhu

α_0 ...úhel nulového náběhu

b ...délka tětivy profilu, hloubka profilu

F_x ...odporová síla

F_y ...vztlaková síla

$$F_x = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_x(\alpha) \cdot S \cdot v^2 \quad [\text{N}] \quad (1)$$

$$F_y = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_y(\alpha) \cdot S \cdot v^2 \quad [\text{N}] \quad (2)$$

ρ ...hustota vzduchu

c_x ...součinitel odporu

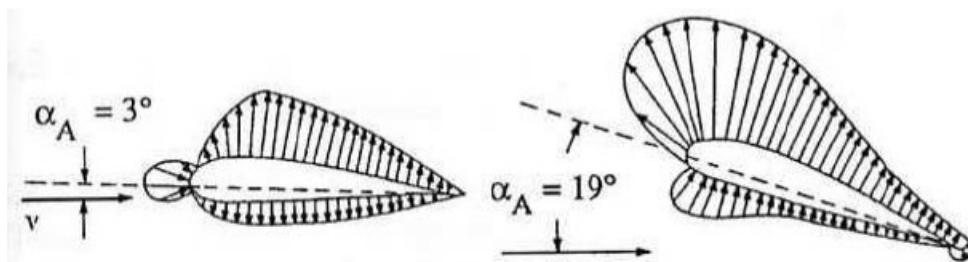
c_y ...součinitel vztlaku

S ...horní plocha křídla

v ...rychlost větru

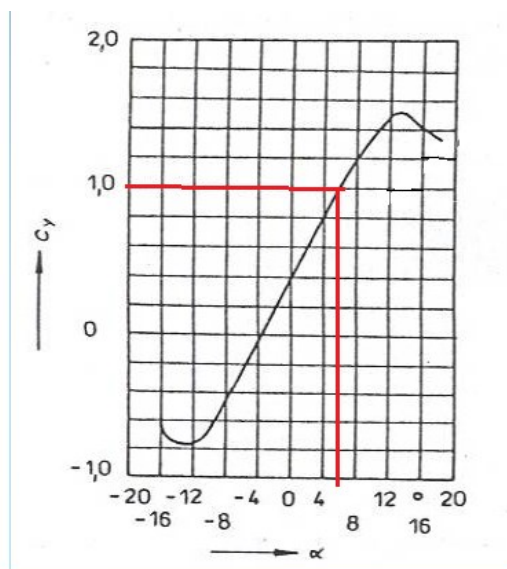
4.3 Určení součinitele vztlaku a odporu

Při natáčení listu, změně úhlu náběhu, dochází ke změnám tlakových poměrů na listu a tím i silových účinků.

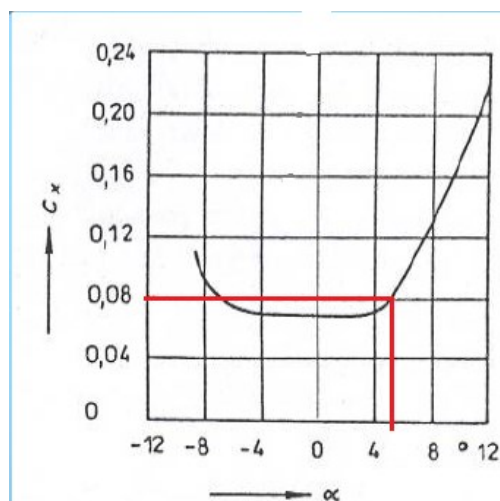


Obrázek 17: Změna tlakových poměrů při natáčení listu [13]

Součinitele vztlaku a odporu se pak stanoví experimentálně. Podle grafu č.1 a 2 odečítám optimální úhel natočení α_A pro daný aerodynamický profil. Úhel α_A jsem zvolil 5° .



Graf 1: Součinitel vztlaku [13]



Graf 2: Součinitel odporu [13]

Z grafů jsem odečetl součinitele vztlaku $c_y=1$ a odporu $c_x=0,08$, které následně použiji pro výpočet silových účinků na zkoumaný profil obtékaný v aerodynamickém tunelu.

4.4 Určení rychlosti větru

Při měření v aerodynamickém tunelu bude maximální rychlost 40 m/s, ale protože je možno měnit rychlost proudění v tunelu a v tunelu budou moci měřit i jiné profily, provedu výpočet i pro rychlost 20m/s

4.5 *Určení rozměrů profilu*

Velikost zkoumaného profilu v tunelu je závislá na rozměrech tunelu. Profil nesmí být moc velký, aby nedocházelo k ovlivňování proudění vzduchu kolem profilu v blízkosti stěn tunelu.

Proto hloubku profilu volím $b=2/3$ výšky tunelu
šířka profilu=šířka tunelu.

Vzhledem k rozměrům mého tunelu volím $b= 0,2$ m a šířka profilu= $0,3$ m. Z těchto rozměrů spočítám plochu profilu:

$$S = b \cdot \text{šířka profilu} \quad [\text{m}^2] \quad (3)$$

$$S = 0,2 \cdot 0,3$$

$$S = 0,06 \text{ m}^2$$

4.6 *Určení hustoty vzduchu*

Protože pro zkoumání aerodynamických vlastností profilu listu větrné elektrárny použiju aerodynamický tunel s otevřeným okruhem, který je umístěn v laboratoři počítám s hustotou vzduchu při pokojové teplotě 25°C . Tedy hustota vzduchu $\rho= 1,184 \text{ kg/m}^3$.

4.7 *Výpočet vztlaku a odporu pro rychlost 40 m/s*

Z hodnot, které jsme si zvolili, vypočítáme vztlakovou a odporovou sílu působící na křídlo. Díky těmto hodnotám, zvolíme vhodné čidlo, kterým budeme v aerodynamickém tunelu zachycovat silové účinky působící na zkoumaný profil listu větrné elektrárny.

Výpočet vztlakové síly:

$$F_y = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_y(\alpha) \cdot S \cdot v^2 \quad [\text{N}] \quad (2)$$

$$F_y = \frac{1}{2} \cdot 1,184 \cdot 1 \cdot 0,06 \cdot 40^2$$

$$F_y = 56,8 \text{ N}$$

Výpočet odporové síly:

$$F_x = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_x(\alpha) \cdot S \cdot v^2 \quad [\text{N}] \quad (1)$$

$$F_x = \frac{1}{2} \cdot 1,184 \cdot 0,08 \cdot 0,06 \cdot 40^2$$

$$F_x = 4,5 \text{ N}$$

4.8 Výpočet vztlaku a odporu pro rychlost 20 m/s

Z hodnot, které jsme si zvolili, vypočítáme vztlakovou a odporovou sílu působící na křídlo i při rychlosti 20 m/s.

Výpočet vztlakové síly:

$$F_y = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_y(\alpha) \cdot S \cdot v^2 \quad [\text{N}] \quad (2)$$

$$F_y = \frac{1}{2} \cdot 1,184 \cdot 1 \cdot 0,06 \cdot 20^2$$

$$F_y = 14,2 \text{ N}$$

Výpočet odporové síly:

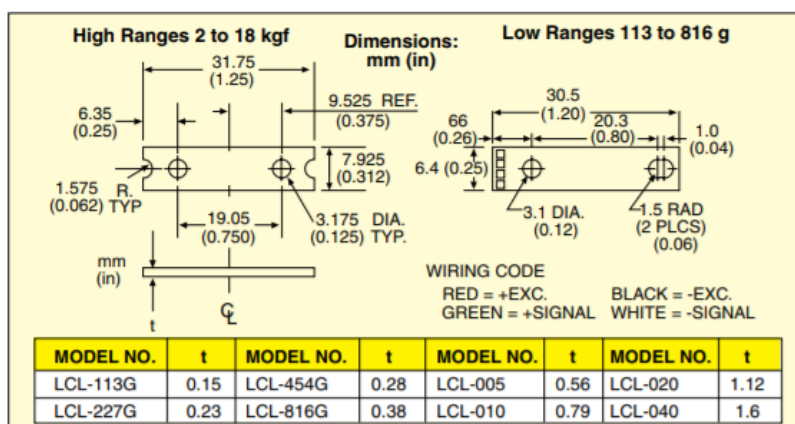
$$F_x = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_x(\alpha) \cdot S \cdot v^2 \quad [\text{N}] \quad (1)$$

$$F_x = \frac{1}{2} \cdot 1,184 \cdot 0,08 \cdot 0,06 \cdot 20^2$$

$$F_x = 1,13 \text{ N}$$

4.9 Volba vhodného vážního čidla pro snímání odporové síly

Pro snímání velikosti odporové síly zatěžující profil v tunelu jsem se rozhodl vybrat vážní čidlo řady LCL společnosti OMEGA.



To Order Visit omega.com/lcl for Pricing and Details			
CAPACITY		MODEL NO.	COMPATIBLE METERS
113 gf	0.25 lb	LCL-113G	DP2000S5, DP25B-S, DPiS
227 gf	0.5 lb	LCL-227G	DP2000S5, DP25B-S, DPiS
454 gf	1 lb	LCL-454G	DP2000S5, DP25B-S, DPiS
816 gf	2 lb	LCL-816G	DP2000S5, DP25B-S, DPiS
2.27 kgf	5 lb	LCL-005	DP2000S5, DP25B-S, DPiS
4.54 kgf	10 lb	LCL-010	DP2000S5, DP25B-S, DPiS
9.07 kgf	20 lb	LCL-020	DP2000S5, DP25B-S, DPiS
18.14 kgf	40 lb	LCL-040	DP2000S5, DP25B-S, DPiS

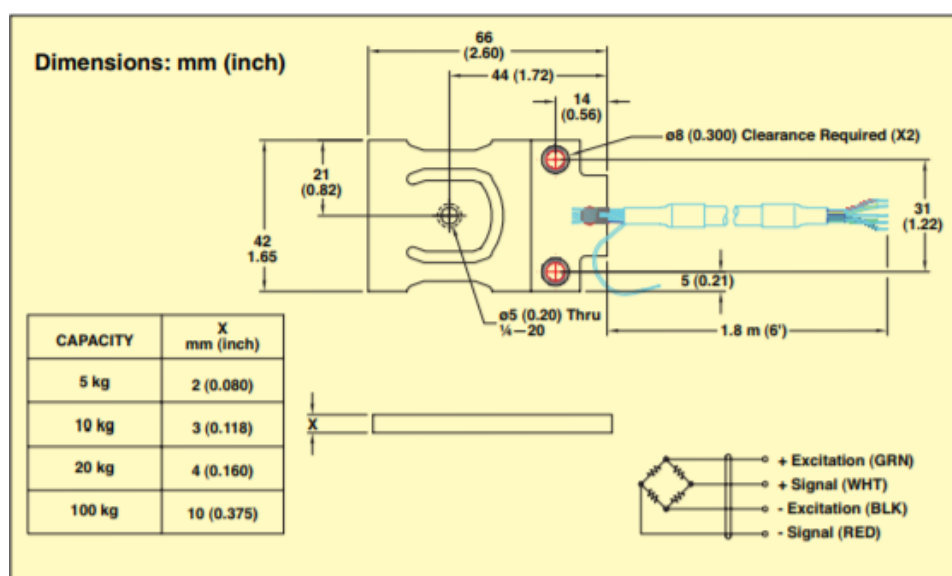
Obrázek 19: Specifikace vážních čidel LCL [14]

Pro měření odporové síly jsem podle předchozích výpočtů vybral model LCL-454G. Toto čidlo má kapacitu zatížení 1 lb, což je v přepočtu 0,46 kg a to odpovídá síle o velikosti 4,6 N.

Čidlo zachytí velikost zatížení, které na něj působí v ose x tzn. velikost odporové síly. Díky těmto hodnotám zjistíme aerodynamické vlastnosti zkoumaného profilu.

4.10 Volba vhodného vážního čidla pro snímání vztlakové síly

Pro snímání velikosti vztlakové síly zatěžující profil v tunelu jsem se rozhodl vybrat vážní čidlo řady LCPB společnosti OMEGA.



To Order Visit omega.com/lcpb for Pricing and Details				
CAPACITY		MODEL NO.	"X" DIMENSION mm (inch)	COMPATIBLE METERS
kg	lb			
5	11	LCPB-5	2.03 (0.080)	DP25B-S, DP41-S, DPiS
10	22	LCPB-10	3.00 (0.118)	DP25B-S, DP41-S, DPiS
20	44	LCPB-20	4.06 (0.160)	DP25B-S, DP41-S, DPiS
100	220	LCPB-100	9.53 (0.375)	DP25B-S, DP41-S, DPiS

Obrázek 20: Specifikace vážních čidel LCPB [14]

Pro měření vztlakové síly jsem podle předchozích výpočtů vybral model LCPB-10. Toto čidlo má kapacitu zatížení 10 kg, což je v přepočtu síla o velikosti 99 N.

Čidlo zachytí velikost zatížení, které na něj působí v ose y tzn. velikost vztlakové síly. Díky těmto hodnotám zjistíme aerodynamické vlastnosti zkoumaného profilu.

5 Návrh uchycení profilu listu v aerodynamickém tunelu

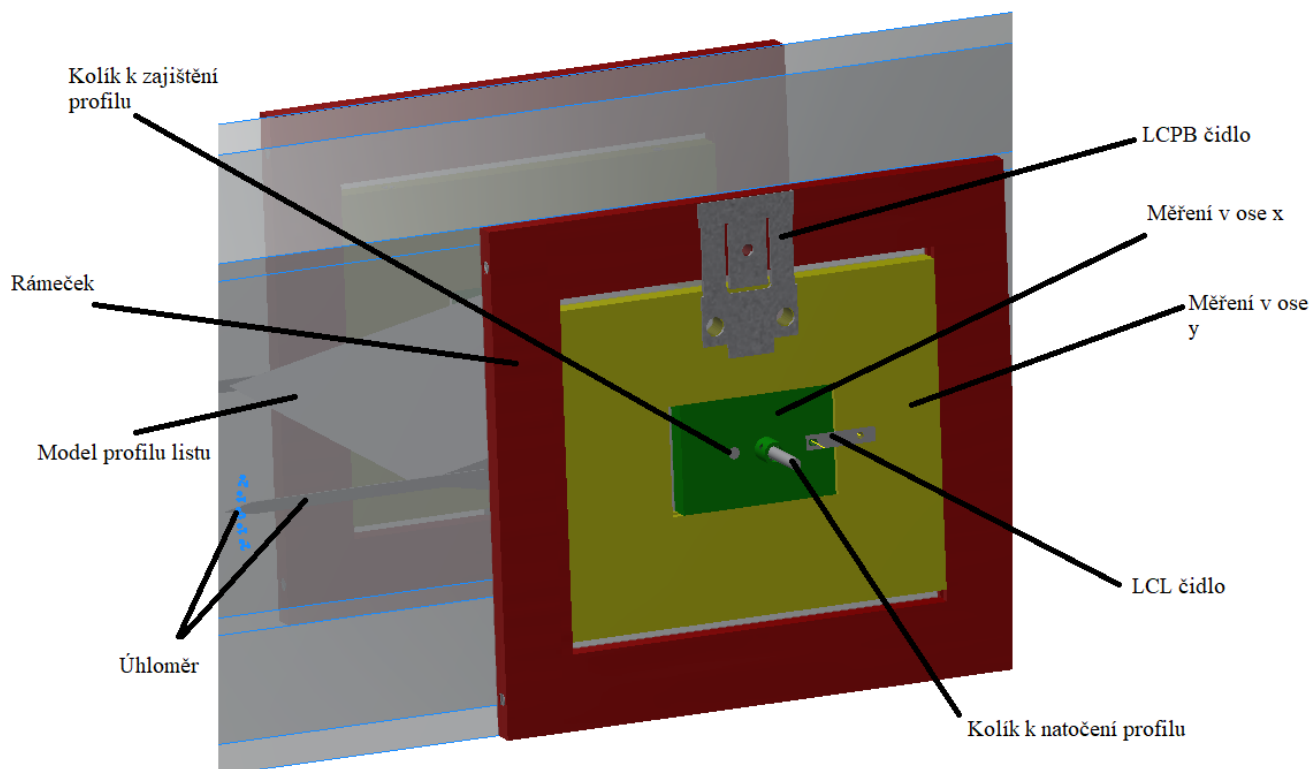
V této kapitole se budu zabývat vhodným způsobem uchycení profilu v aerodynamickém tunelu s možností jeho natáčení. Při navrhování musím brát ohled na velikost sil, které na profil budou při zkoumání působit a zvolená čidla. S ohledem na předpokládané optimální proudění a obtékání aerodynamického profilu volím obdélníkový průřez měřicí části aerodynamického tunelu, zde předpokládám, že vstupní část do měřeného úseku ještě bude optimalizována. Před rovinou měření bude úsek čtvercového profilu v délce min 7D.

5.1 Základní části navrhovaného uchycení

V této části navrhuji systém uchycení aerodynamického profilu. Základní motivací je nezávislé měření silových účinků a to v ose x a y s možností nastavení žádaného úhlu náběhu s aretací. Navrhuji systém viz Obr. č.

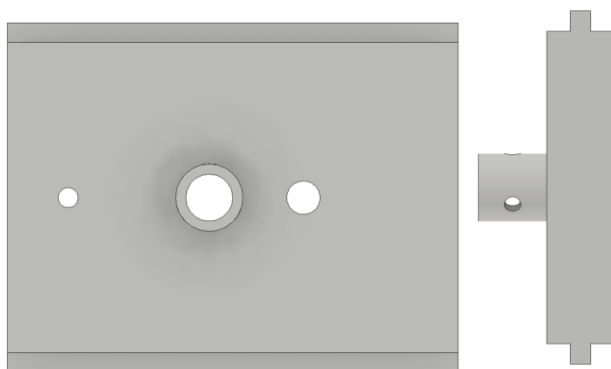
Principiálně se skládá ze základní desky (1), kterou prochází osa (3) na které je uchycen aerodynamický profil a ke které je tento profil aretován spojem (1). Tato základní deska je umístěná ve vodorovných kolejničkách, a je přes vážní čidlo (5) uchycená k rámečku (2). Rámeček je dále umístěn ve svislých kolejničkách rámu (4) a je uchycen vážním čidlem (5). Rám je uchycen k tělesu měřicí části aerodynamického tunelu.

1. Měření v ose x
2. Měření v ose y
3. Natáčení profilu
4. Rám
5. LCPB a LCL čidlo



Obrázek 21: Navržené uchycení profilu listu v aerodynamickém tunelu

5.1.1 Měření v ose x



Obrázek 22: Měření v ose x

Tato součást navrhovaného uchycení slouží k posunu v ose x při působení sil na profil listu v aerodynamickém tunelu. Posun je zajištěn pomocí dvou kolejniček, které se pohybují v drážkách v součástce pro měření v ose y.

Tento díl je třeba vhodné vyrobít z materiálu, který má dobré kluzné vlastnosti (např. nylatron, ertanol) nebo je možné ho vyrobít z oceli a kolejničky povlakovat uhlíkovým povlakem. Je to z důvodu zmenšení třecí síly při měření a tedy co největší zamezení ovlivnění měření.

Osa prochází okem, kde je umístěn aretační šroub. Dále je v něm vyfrézovaná drážka pro kolík k nastavení natočení profilu listu v tunelu.

Váží čidlo je přiděleno k tomuto dílu a k dílu pro měření v ose y. Díky tomu se při měření čidlo natahuje a tím zaznamenává velikost působící odporové síly na profil.

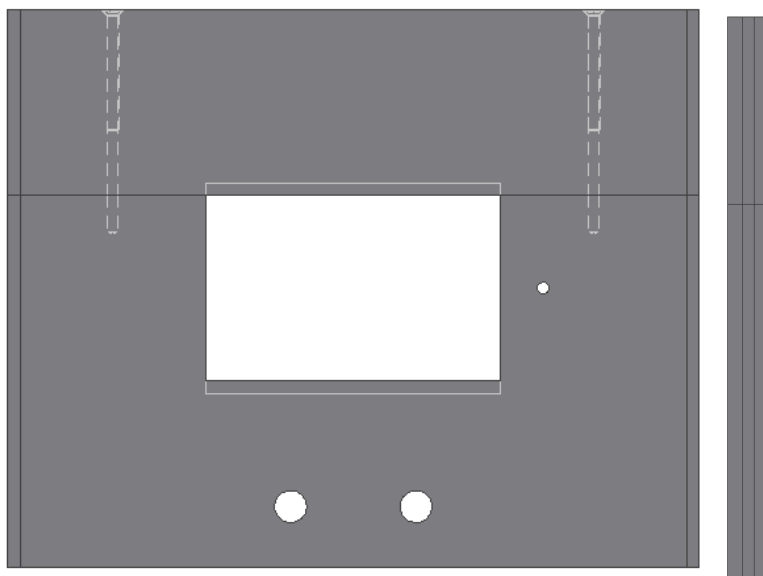
5.1.2 Měření v ose y

Tato součást se při působení sil na profil listu posouvá v ose y. Posun je opět zajištěn pomocí dvou kolejniček, které se pohybují v drážkách v rámečku.

V otvoru jsou vyfrézované drážky, v kterých se pohybuje součást pro měření v ose x. Aby tyto drážky bylo možné vyfrézovat je tento díl vyroben ze dvou částí, které jsou spojeny pomocí dvou šroubů se zápusťnou hlavou.

Tento díl je vhodné vyrobit ze stejného materiálu jako díl pro měření v ose x.

Díl je spojen vážním čidlem s rámečkem a díky tomu zaznamenává velikost působící vztlačové síly na profil.



Obrázek 23: Měření v ose y

5.1.3 Natáčení profilu

Natáčení profilu se skládá ze tří částí:

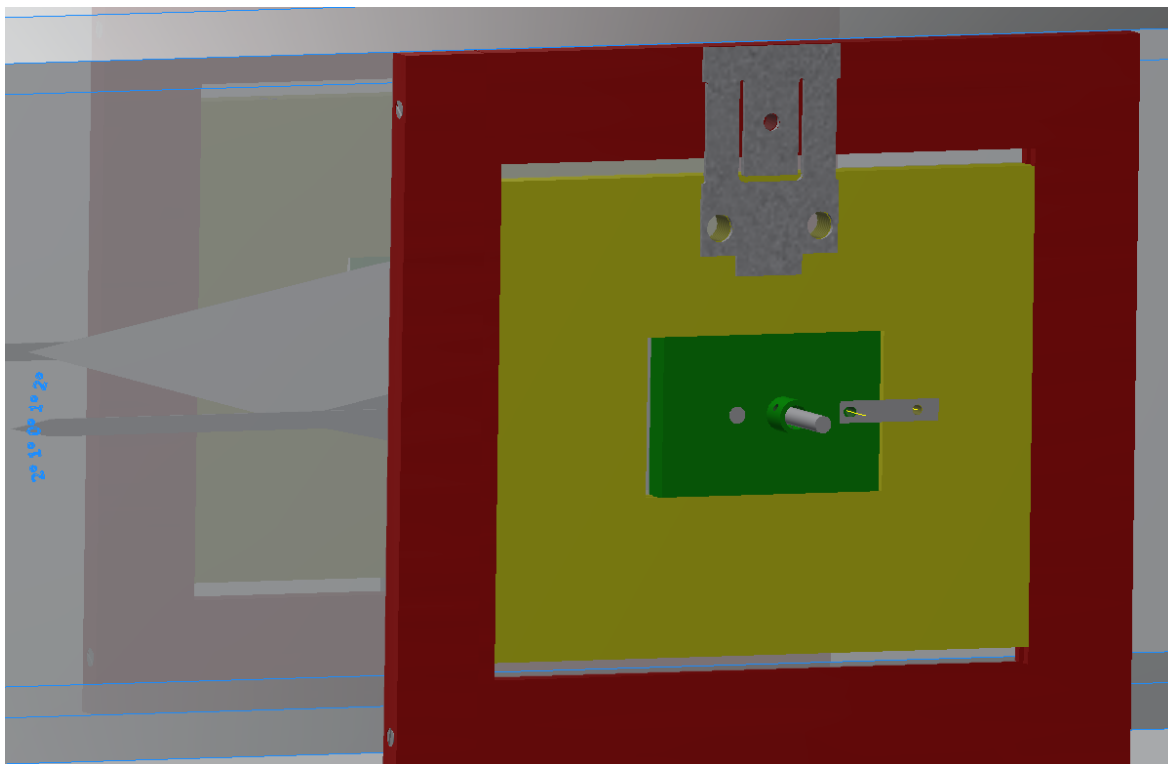
- Úhloměr (obr. 24, pozice 2)
- Kolík k natočení profilu listu (obr. 24, pozice 3)
- Kolík k zajištění profilu listu (obr. 24, pozice 4)

Kolík k zajištění profilu listu zajišťuje profil listu v nastavené poloze při měření. Aby nedošlo k jeho zlomení nebo jiné deformaci, měl by být vyroben např. z polypropylenu.

Kolík k natočení profilu listu slouží k natočení profilu v aerodynamickém tunelu. Měl by být vyroben ze stejného materiálu jako kolík k zajištění profilu listu. Jako pojistka při natočení je navržena objímka, která je přidělena k dílu pro měření v ose x a aretační šrouby, které zabráňují pohybu kolíku k natočení profilu a tím i samovolnému natáčení profilu.

Při natáčení nám jako ukazatel natočení slouží úhloměr na stěně aerodynamického tunelu.

Základní rovina při měření je vyznačená spojnice náběžné a odtokové hrany profilu listu, tzn. Že tato rovina je ve vodorovné poloze při natočení 0° . Úhloměr je pak na průhledném těle měřicího úseku aerodynamického profilu umístěn tak, aby respektoval měření úhlu, střed na odtokové hraně profilu.

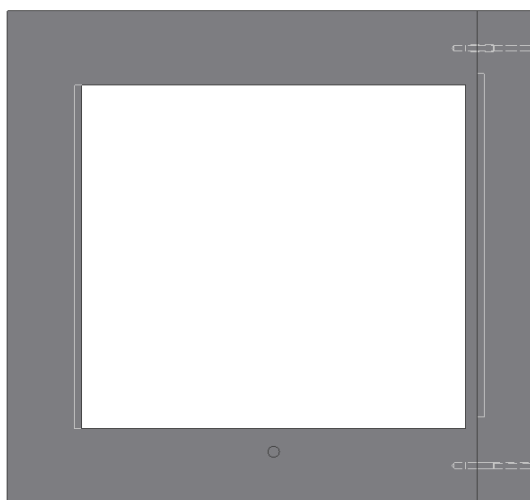


Obrázek 24: Uchycení profilu v tunelu a způsob natáčení

5.1.4 Rámeček

V rámečku jsou vyfrézované dvě drážky, v kterých se pohybuje část pro měření v ose y. Pro jejich vyfrézování je rámeček rozdělen na dvě části, které jsou sešroubované stejným způsobem jako část pro měření v ose y.

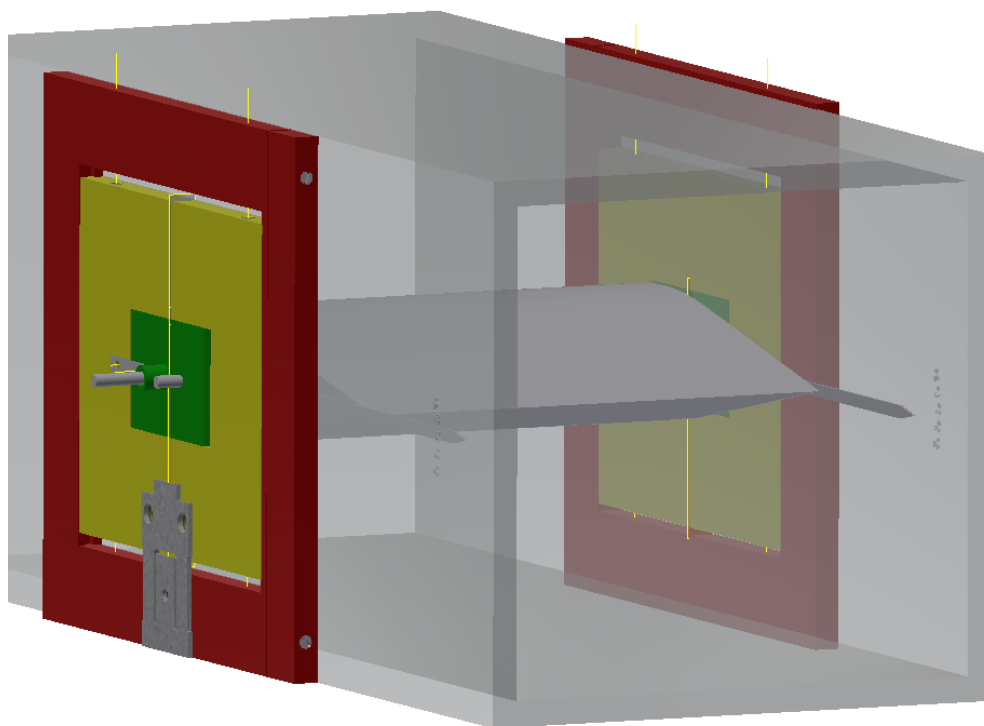
Vyrobení rámečku je vhodné ze stejného materiálu jako díl pro měření v ose x a díl pro měření v ose y.



Obrázek 25: Rámeček

5.1.5 Úprava aerodynamického tunelu

Jak již bylo řečeno navrhuji 7D rovného úseku zvoleného obdélníkového tvaru před profilem tak, aby nebylo nutno umisťovat do proudu vzdušiny usměrňovací voštiny s ohledem na jejich tlakovou ztrátu. Primární zrovnoměnění proudu vzdušiny je dosahováno ve stávající vstupní části aerodynamického tunelu. Navrhované řešení bude ověřeno ověřovacím měřením na díle.



Obrázek 26: Měřicí část aerodynamického tunelu

Závěr

Cílem práce bylo navržení úpravy aerodynamického tunelu umístěného na VŠB-TUO pro zkoumání aerodynamických vlastností profilů listů větrné elektrárny.

V bakalářské práci jsem se zabýval základními znalostmi o větrných elektrárnách a jejich vývoji. Dále jsem popsal základní aerodynamické vztahy profilů listů větrných elektráren. A na závěr úvodní části jsem se zaměřil na rozdělení aerodynamických tunelů, jejich konstrukci a výhody, nevýhody.

Ve výpočtové části práce jsem spočítal základní aerodynamické síly na vybraný profil listů větrných elektráren pro předpokládané rychlosti obtékání profilu proudící vzdušiny. Výsledkem jsou předpokládané velikosti vztlakové a odporové síly působící v aerodynamickém profilu. Po tomto výpočtu jsem navrhl vážní čidla model LCPB-5 a LCL-454 G.

V poslední části práce jsem se zabýval samotným návrhem uchycení profilu listů v aerodynamickém tunelu a úpravou aerodynamického tunelu. Základním principem mého návrhu je pohyb dvou dílů (pro měření v ose x a y) v rámečku, pomocí drážek. A díky natáčecímu systému je možné profil listu v tunelu natáčet do libovolné polohy.

Výsledkem této práce je rozšíření možnosti využití aerodynamického tunelu umístěného v laboratořích katedry energetiky VŠB-TU Ostrava především o úlohy měření charakteristik obtékání aerodynamických profilů větrných elektráren cíleně pak v relevantních předmětech výuky studentů katedry.

Použité zdroje a literatura

Zdroje

- [1] Z historie větrných elektráren: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/> [online]. [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/z-historie-vetrnych-elektren--13364>
- [2] Větrné elektrárny IV. – Vývoj instalací v ČR i ve světě od přelomu tisíciletí: <http://www.tzb-info.cz/> [online]. [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/13909-vetrne-elektarny-iv-vyvoj-instalaci-v-cr-i-ve-svete-od-prelomu-tisicileti>
- [3] HÁJEK, Martin. Větrné elektrárny-princip, rozdělení. <Http://oenergetice.cz/> [online]. 2015 [cit. 2017-02-04]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/typy-elektren/vetrne-elektarny-princip-cinnosti-zakladni-rozdeleni/>
- [4] Budoucí vývoj rotorový listů pro větrné elektrárny: <http://www.csve.cz/cz/> [online]. [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/clanky/budouci-vyvoj-rotorovy-listu-pro-vetrne-elektarny/321#prettyPhoto>
- [5] SZELIGA, Zbyszek. Obnovitelné zdroje energie – energie větrná, větrné motory. <Http://kke.zcu.cz/> [online]. 2012 [cit. 2017-02-04]. Dostupné z: http://kke.zcu.cz/export/sites/kke/old_web/_files/projekty/enazp/21/IUT/138_OZE_vitr_v_oda_palivove_clanky_-_P3.pdf
- [6] Větrné elektrárny III. – Větrná energie v ČR do roku 2000: <http://www.tzb-info.cz/> [online]. [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/13730-vetrne-elektarny-iii-vetrna-energie-v-cr-do-roku-2000>
- [7] Aerodynamický tunel: <https://leporelo.info/encyklopedie-1> [online]. [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: <https://leporelo.info/aerodynamicky-tunel>
- [8] KATZ, J. Race car aerodynamics: designing for speed. Bentley Publishers, 2006. ISBN 0-8376-0142-8.
- [9] Aerodynamický tunel: <http://www.cojeco.cz/> [online]. [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: http://www.cojeco.cz/index.php?detail=1&id_desc=893&s_lang=2&title=aerodynamick%FD%20tunel%20
- [10] Wind tunnel: https://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page [online]. [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_tunnel
- [11] Nízkorychlostní tunely: <http://www.vzlu.cz/cs/> [online]. [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: <http://www.vzlu.cz/cs/nizkorychlostni-tunely-c73.html>

- [12] Vysokorychlostní tunely: <http://www.vzlu.cz/cs/> [online]. [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: <http://www.vzlu.cz/cs/vysokorychlostni-tunely-c72.html>
- [13] SCHNEIDER, Marek. *Technická dokumentace aerodynamického tunelu*. Ostrava, 2003. Bakalářská práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava.
- [14] Vážní čidlo. *Omega* [online]. Česko: Omega, 2018 [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <https://www.omegaeng.cz/pptst/LCPB.html#description>

Přílohy

1. Měření v osách x, y
2. Měření v ose x
3. Měření v ose y
4. Osa k uchycení listu
5. Tunel
6. Uchycení a měření profilu v tunelu
7. Uchycení listu